

ЭФФЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛА В КОНСТРУКЦИИ ВОЛНОВОДОВ

Абдуллин Р.Р.

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Исследовано понятие метаматериала, описывается его суть, приведены свойства и причины их возникновения. Представлены различные варианты исполнения метаматериалов, дана методика расчета их резонансной частоты. Вводятся понятия отрицательной групповой скорости, левой среды, прямой и обратной волн. Исследованы эффекты применения метаматериалов в конструкциях волноводов различного рода и форм поперечного сечения. Проанализировано влияние ориентации включений относительно падающей волны на характеристики направляющей структуры. Сделан вывод о возможности использования волновода, заполненного метаматериалом, в основе конструкции антенны вытекающих волн.

Ключевые слова: метаматериалы, левая среда, обратная волна, волновод.

EFFECTS OF USING METAMATERIAL IN WAVEGUIDE DESIGN

Abdullin R.R.

FSAEI HPE «UralFederalUniversitynamed after the first President of Russia B.N.Yeltsin»

A concept of metamaterials is investigated, its essence is described, properties and its causes are shown. Different versions of metamaterials are presented, and calculation method of resonant frequency is given. The concepts of negative group velocity, left-handed media, forward and backward wave are introduced. Effects of using metamaterials in design of the various waveguides with the different cross section form are investigated. An influence of inclusions orientation relative to an incident wave on the guided structure performances is analyzed. The conclusion about possibility of using metamaterial loaded waveguide as a leaky-wave antenna base is made.

Keywords: matamaterials, left-handed media, backward wave, waveguide.

Введение

В последние годы все больший интерес приобретает использование в технике СВЧ так называемого метаматериала – композитного материала, не существующего в природе и отличающегося отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей, как по отдельности (SNG – single negative), так и одновременно (DNG –double negative). В последнем случае среда приобретает новые удивительные свойства, такие как отрицательный коэффициент преломления, обратный эффект Доплера, отрицательная групповая скорость.

Факт возможности существования такой среды был доказан теоретически советским физиком Виктором Веселаго в 1967 году [1]. С тех пор накопился достаточно широкий спектр практических наработок, и на данный момент метаматериалы начинают активно внедряться в радиотехнических приложениях.

Применение метаматериалов в качестве подложек печатных антенн позволяет достичь широкополосности и уменьшения массогабаритных характеристик антенных элементов. Также возможно согласование различного рода антенн с питающей линией за счет

компенсации реактивности в широкой полосе частот и повышение коэффициента усиления при сохранении исходных размеров антенны [4].

Целью данной работы является исследование свойств распространения радиоволн в волноводных системах, заполненных метаматериалом, для оценки возможности построения на их основе антенн вытекающей волны.

Элементарная ячейка метаматериала

Описанные выше свойства метаматериалов являются результатом специальной искусственно созданной дискретности их структуры. Величина ячеек такой структуры должна быть много меньше длины падающей на нее волны. Тогда электромагнитный отклик формируется не отдельными молекулами вещества, как это бывает в обычном случае, а структурой в целом, где строго заданная периодичность включений выступает в качестве атомной решетки.

Наибольшее распространение в СВЧ технике получили две конструкции метаматериалов. Во-первых, это сетка из тонких проводников. Во-вторых, это резонаторы из разрезных колец (SRR – split ring resonator), и их разнообразные модификации (см. рис. 1) [14]. В разрезном кольцевом резонаторе магнитный поток, проходящий через металлическое кольцо, наводит в нем круговые токи, аналогичные токам, обуславливающим магнетизм некоторых материалов. А в решетке из прямых металлических стержней электрическое поле создает направленные вдоль них токи. Таким образом, использование металлической сетки приводит к большим отрицательным значениям диэлектрической проницаемости ϵ на низких частотах [13], а кольца с разрезами могут имитировать материал с отрицательной магнитной проницаемостью μ .

Наиболее ярко новые свойства проявляются при резонансном возбуждении включений. Для структуры из N элементов частота резонанса определяется длиной колец (индуктивность) и размерами зазора (емкость)[14]:

$$f_r = 1 / (2\pi\sqrt{LC}),$$

$$L = \frac{\mu_0}{2} \frac{l_{avg}}{4} 4,86 \left[\ln \frac{0,98}{\rho} + 1,84\rho \right], C = A(N-1) \left[r_{ext} - \frac{c}{2} - \frac{(N-1)(c+d)}{2} \right] C_p,$$

$$\rho = \frac{(N-1)(c+d)}{2r_{ext} - c + (N-1)(c+d)}, l_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N l_n = B \left[r_{ext} + d + \frac{c}{2} - \frac{N+1}{2}(c+d) \right],$$

где $A = \pi/2, \pi/8, 2, 3/2, B = 2\pi, 2\pi, 8, 6$ для SRR, DSR, SSRR и USRR, соответственно.

Объединение кольцевых резонаторов и металлических проводников в решетку приводит к созданию биотрицательной (DNG) среды. Если электрический резонатор расположен в плоскости, параллельной плоскости SRR, то он обладает таким же магнитным откликом, как и магнитное поле, поперечное ему. В этом случае, соответствующие отклики электрических и магнитных элементов не являются аддитивными, а структура метаматериала должна рассматриваться для моделирования как состоящая из двух элементов с самого начала [13].

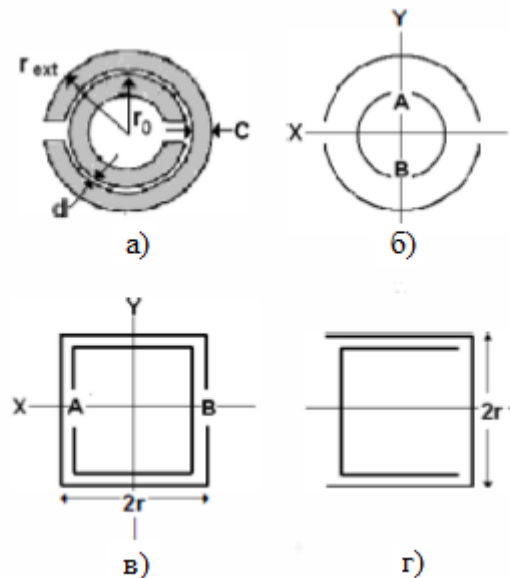


Рис 1. Примеры исполнения ячейки метаматериала: а) SRR – разрезной кольцевой резонатор; б) DSR – кольцевой резонатор с двумя разрезами в) SSRR – квадратный разрезной кольцевой резонатор; г) USRR – разрезной кольцевой резонатор формы U.

Метаматериалы в волноводах

При исследовании распространения радиоволн в направляющих структурах, заполненных метаматериалом, в частности в волноводах, становится актуальным такое явление как обратная волна – волна с отрицательной групповой скоростью. Если проницаемости диэлектрика ϵ и μ , заполняющего волновод, отрицательны, векторы E , H и волновой вектор k образуют левую тройку (отсюда еще одно название метаматериала – левая среда). Тогда вектор Пойнтинга и волновой вектор k противоположны [3]. Для однородной плоской монохроматической волны в однородной изотропной непоглощающей (неусиливающей) среде знак групповой скорости задается только законом дисперсии среды [2].

Прямоугольный волновод

В соответствии с формой описанных выше элементарных ячеек, метаматериал анизотропен, и оказывает различное влияние на характеристики систем в зависимости от

ориентации относительно падающей волны. Например, в [7] обратное распространение происходит, когда продольная магнитная проницаемость положительна, а поперечная – отрицательна (см. рис. 2) [7]. В таком случае на частоте резонанса элементарной ячейки метаматериала волновод поддерживает распространение обратных волн ниже граничной частоты основной моды H_{10} . Низшая частота распространения и, следовательно, уменьшение размеров, диктуются возможностью изготовления одноосного μ -отрицательного метаматериала на конкретной частоте.

Указанные в [7] заключения справедливы и для волновода, заполненного ϵ -отрицательным материалом, с той лишь разницей, что в этом случае речь идет об основной волне типа E, то есть E_{11} [9]. Феномен распространения обратной волны ниже критической частоты основной волны H (MNG) или E (ENG) происходит по причине различной ориентации поперечных компонентов векторов H и B (или E и D) внутри волновода.

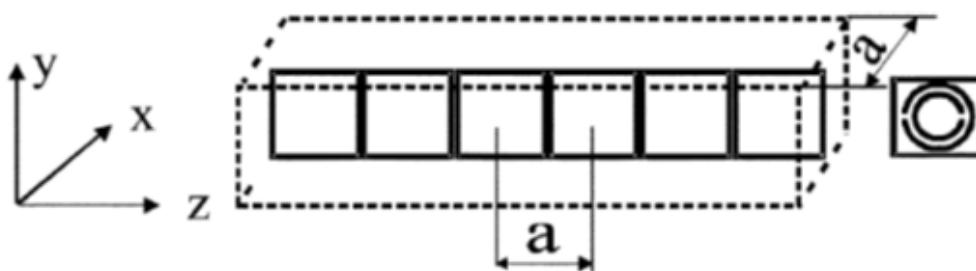


Рис. 2. Ориентация ячеек метаматериала в прямоугольном волноводе.

Следует дополнительно обратить внимание, что применение конструкции, предложенной в [7], корректно только в отношении основной волны. Волны более высоких типов имеют более короткие длины волн, и по сравнению с ними размеры элементарных ячеек метаматериала уже не будут являться электрически малыми.

Указанного недостатка лишена модифицированная структура резонаторов из разрезных колец (MSRR), изображенная на рис. 3 [11]. Структура представляет собой два квадратных DSRR, вытравленных на разных сторонах диэлектрической пластины и повернутых друг относительно друга на 90 градусов. Такой элемент имеет меньшие электрические размеры и гораздо больший диапазон частот, в котором эффективная проницаемость отрицательна. Симметрия устраняет бианизотропность, а размеры структуры получаются меньше одной десятой рабочей длины волны.

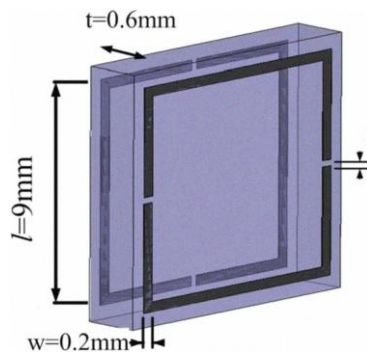


Рис. 3. Эскиз модифицированного SRR.

Использование решетки MSRR в волноводе приводит не к появлению узкой полосы пропускания ниже критической частоты, а к значительному снижению критической частоты всей волноводной системы в целом, как для прямой, так и для обратной волн, за счет сильной электромагнитной связи между последовательными элементами. Однако, по этой же причине происходит уменьшение уровня передачи. Для решения этой проблемы необходимо введение в структуру дополнительных индуктивных "окон" [11].

Планарный волновод

Частным случаем прямоугольного волновода является планарный волновод – волновод, встроенный в полосковую линию. Метаматериал здесь может быть использован в качестве подложки, и все заключения, сделанные ранее будут справедливы и для данного случая [5]. Такой волновод поддерживает прямую, обратную и стоячую волны. В случае прямой волны, антенна, произведенная на основе такого волновода, может излучать в направлении 0 градусов. В случае обратной волны, наблюдается эффект обратного излучения, то есть диаграмма направленности формируется в направлении 180 градусов.

Круглый волновод

Помимо прямоугольных волноводов метаматериалы нашли применение и в круглых. В абсолютном большинстве работ по данной тематике используется конструкция, когда слой метаматериала определенной толщины расположен у стенки волновода, подобно годовым кольцам на спиле дерева (см. рис. 4а) [13].

Например, в [13] направляющая структура формируется радиально установленными пластинами с метаматериалами, вытравленными на них: магнитные элементы на одной стороне, и электрические – на другой (см. рис 4б) [13]. Установленные пластины с однородным распределением идентичных резонансных структур приводят к неоднородному распределению эффективных параметров среды. Для того, чтобы компенсировать пространственную неоднородность полученных эффективных параметров на выбранной частоте варьируются параметры элементов метаматериала, а не их плотность, так как

последняя благодаря смене ориентации SRR, может являться причиной паразитной электромагнитной связи.

Увеличение абсолютного значения проницаемости, вызванное увеличением дистанции между SRR, компенсируется путем надлежащего увеличения ширины кольца.

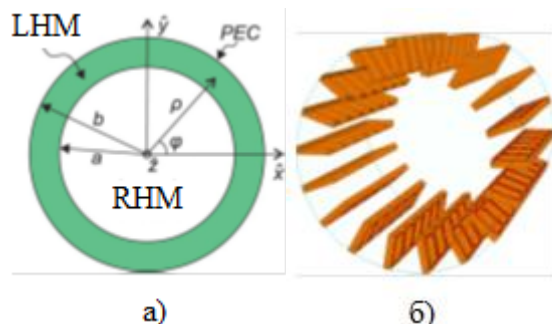


Рис. 4. Расположение метаматериала в круглом волноводе: а) эскиз; б) физическая реализация.

В [10] было замечено, что введение такого кольца из метаматериала в волновод приводит к спектру гибридных волн, которые могут быть классифицированы как затухающие, распространяющиеся и комплексные. В то время как критическая частота основной волны практически не зависит от введения кольца из метаматериала, для обратной волны появляется полоса пропускания ниже критической частоты, когда действительная часть диэлектрической проводимости метаматериала принимает отрицательные значения. Эта волна также обладает однородным коллимированным полем, при этом наибольшая вариация поля имеет место в кольце.

Диэлектрический волновод

Структуру, подобную описанной в [5] и [13], имеют и диэлектрические волноводы, с той лишь разницей, что они не обладают внешней металлической стенкой: цилиндрический диэлектрик покрыт слоем метаматериала (см. рис. 5 [12]). Эта аналогия касается и характера распространения радиоволн. В [12] сообщается, что при определенных условиях Е и Н волны, поддерживаемые волноводом, имеют как прямую так и обратную волны. При критическом радиусе волновода прямая и обратная волны сливаются. Общая передаваемая мощность становится равной нулю.

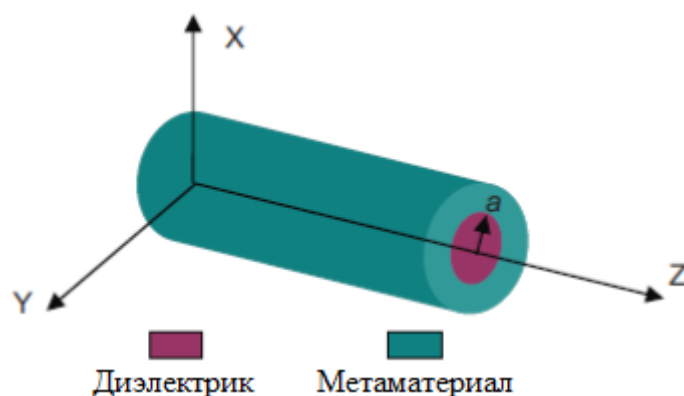


Рис. 5. Диэлектрический волновод со слоем метаматериала.

Согласно [6] при некоторых анизотропных поверхностных сопротивлениях на стенках волновода, критическая частота основной волны ниже критической частоты H_{11} в металлическом волноводе, что позволяет уменьшить сечение волновода на 23%. Значительное уменьшение поперечного сечения волновода позволяет существенно снизить массу волновода и облегчить размещение полезной нагрузки.

Заключение

Противоречащее здравому смыслу распространение радиоволн внутри субволновых проводящих структур возможно. Оно опирается на сокращение длины волны в зависимости от направления потока энергии. Показано, что и прямая и обратная волны возможны в субволновом волноводе, в зависимости от ориентации анизотропного материала.

Проведенный сравнительный анализ позволяет заключить, что независимо от геометрии волноводов, применение в их конструкции метаматериалов приводит к достаточно похожим результатам. Главным образом, это возможность одновременного сосуществования в направляющей структуре как прямой, так и обратной волн. А во-вторых, это возможность распространения волн на частоте ниже критической.

В связи с этим видятся два основных направления применения метаматериалов в волноводной технике. Во-первых, это миниатюризация существующих СВЧ-устройств, в том числе и антенн, во-вторых, создание высокоэффективных волноводных фильтров.

Волновод со специально спроектированным одноосным заполнением из метаматериала поддерживает три моды распространения (обратная волна, волна с нулевой постоянной распространения и прямая волна). Если такой волновод имеет, например, продольную щель, возможно объединить энергию всех трех мод свободного пространства в излучение антенны вытекающей волны. Это свойство может быть использовано для

построения антенны вытекающей волны с возможностью сканирования диаграммы направленности в широком диапазоне углов [8].

Дальнейшее исследование может быть направлено на изучение свойств прямоугольного волновода, частично заполненного метаматериалом, а также свойств антенны вытекающей волны на его основе. Могут быть получены зависимости коэффициента замедления излучающей структуры, угла наклона и ширины диаграммы направленности от геометрических размеров включений метаматериала, шага и степени заполнения волновода.

Библиографический список

1. Веселаго В.Г. "Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ " // Успехи физических наук. 92 517–526 (1967).
2. Мандельштам Л.И. Полное собрание трудов. Т.5 (М.: Изд-во АН СССР, 1950).
3. Раутиан С.Г.
Об отражении и преломлении на границе среды с отрицательной групповой скоростью // Успехи физических наук. Октябрь 2008, Том 178 № 10.
4. Слюсар В. Метаматериалы в конструкциях антенн. // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2009. - №. 8. С. 66–70 (2009).
5. Basharin A.A., Balabukha N.P., Semenenko V.N., Menshikh N.L. *Metamaterial waveguides and antennas, wave propagation*. InTech, 2011. 570 p.
6. Capet N., Byrne B., Claudepierre L., Raveu N. *Metamaterial waveguide with reduced cross section*. 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 8-12 April 2013. Gothenburg, Sweden. pp. 2155-2157.
7. Hrabar S., Bartolic J., Sipus Z. *Waveguide miniaturization using uniaxial negative permeability metamaterial*. IEEE Transactions on antennas and propagation. Vol. 53, Issue: 11. Nov. 2005.
8. Hrabar S., Jankovic G., *Scanning leaky-wave antenna based on a waveguide filled with plasma-like ENG metamaterial*. IEEE MELECON 2006, May 16-19, 2006. Benalmádena (Málaga), Spain. pp. 280-283.
9. Hrabar S., Jankovic G., Zivkovic B., Sipus Z. *Numerical and experimental investigation of field distribution in waveguide filled with anisotropic single negative metamaterial*. 2005 18th

International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom). 12 - 14 Oct 2005. Dubrovnik, Croatia.

10. Pollock J.G., Iyer A.K. *Below-cutoff propagation in metamaterial-lined circular waveguides*. IEEE Transactions on microwave theory and techniques. Vol. 61, no. 9, September 2013.
11. Qi Tang, Fan-Yi Meng, Qun Wu. *Broadband Compact Waveguide Loaded with Modified Split Ring Resonators Metamateria*. 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 12 - 16 April, 2010, Beijing, China. pp. 453-456.
12. Qi Zhang, Tian Jiang, and YijunFeng. *Slow Wave Propagation in a Dielectric Cylindrical Waveguide with Anisotropic Metamaterial Cladding*. Microwave Conference, 2009. APMC 2009. Asia Pacific. 7-10 Dec. 2009. Singapore. pp. 1242-1245.
13. Shchegolkov D.Yu., Azad A.K., O'Hara J.F., Smirnova E.I. *A proposed measurement of the reverse cherenkov radiation effect in a metamaterial-loaded circular waveguide*. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008. IRMMW-THz 2008. 15-19 Sept, 2008. Pasadena, USA.
14. SubalKar, ShibShankarSikdar, TulipKumarSaha. *Metamaterial Loaded waveguide characterization - some basic studies*. International Conference of Informatics, Electronics & Vision, 2012. 18-19 May 2012. Dhaka, Bangladesh. pp. 1203-1205.